

Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahn- planungen

***Matthias Dittmer
Frank Geraets
Axel Schwipps***

“Nach dem Fall der Mauer hätte das Zusammenwachsen von Berlin effektiver erfolgen können, wenn die acht Wendeschleifen der Straßenbahn vor der Mauer um einige Kilometer zum nächsten westlichen S- oder U-Bahnhof verlängert worden wären. Vier Kilometer U-Bahn-Verlängerung aber vom Alexanderplatz zum Hauptbahnhof – parallel zu einer existierenden S-Bahnstrecke – erschienen damals wichtiger. Der einzige Grund für diese Entscheidung war, dass die U-Bahn den Autoverkehr nicht stört. Die Umsetzung dauerte 30 Jahre, während in zehn Jahren der Bau von 100 Kilometern Straßenbahn möglich gewesen wäre.

*Wir werden ab sofort **bei all unseren Entscheidungen die Klimaverträglichkeit beleuchten** müssen und daher auch zu anderen Ergebnissen kommen als bisher. In dieser Zeitenwende leben wir. Und am Ende des Tages werden wir sehr genau alle CO₂-Emissionen einer jeden Infrastrukturmaßnahme ins Verhältnis zur Klimafreundlichkeit des Betriebs setzen. Also die Zeiträume berechnen und bewerten müssen, die notwendig sind, bis die Emissionen sich amortisiert haben.”*

Zitat Michael Cramer, Bündnis 90/Die Grünen. Von 2004 bis 2019 war Cramer Mitglied des Europäischen Parlaments, von 2014 bis 2017 Vorsitzender des Ausschusses für Verkehr und Fremdenverkehr.

In Berlin wird für die Lösung von Verkehrsproblemen häufig der **Bau von U-Bahn-Verlängerungen** vorgeschlagen. Gelegentlich kommt es sogar zu einem Überbietungswettbewerb von originellen bis hin zu kaum realisierbaren Ideen. Diese Debatte bedarf der Versachlichung mit klaren und objektiv messbaren Kriterien der Beurteilung. Vor allem dann, wenn es darum geht, die **Vor- und Nachteile verschiedener Verkehrsmittel** zu ermitteln.

Zu den Kriterien, die bei der Bewertung bereits Berücksichtigung finden, gehört der finanzielle Aufwand. In dem sich vertiefenden Diskurs wird auch meist die Dauer der Umsetzung berücksichtigt: also die Zeiträume, die für die Planungen, Genehmigungsverfahren und Baumaßnahmen erforderlich sind, bis der Nutzen des Verkehrsmittels zum Tragen kommt.

Die Klimabilanz allerdings, die in unserem Denken **notwendigerweise** eine immer größere Wichtigkeit einnimmt, spielt bei der Beurteilung verkehrspolitischer Maßnahmen bislang eine untergeordnete Rolle. Im Gegenteil, dem öffentlichen Verkehr wird, weil er ja Auto-Wege einspart, eine grundsätzlich positive Klimabilanz unterstellt.

Das Autorenteam der vorliegenden Studie hat sich zur Aufgabe gestellt, die **Annahme zu hinterfragen**, dass dem öffentlichen Verkehr eine **grundsätzlich positive Klimabilanz** zu unterstellen sei. Im Sinn einer gesamtwirtschaftlichen Beurteilung wird der Aufwand in Relation gestellt zum Nutzen. Dazu wird die Klimafreundlichkeit eines künftigen U-Bahn-Verkehrsangebots **ins Verhältnis gesetzt** zur **Klimabelastung des Baus** seiner Infrastruktur. Zum Vergleich wird unter gleicher Fragestellung ein Streckenneubau für Straßenbahnen untersucht.

Die Aufgabenstellung erfordert eine genaue Ermittlung der CO₂-Emissionen des Tunnel-, Bahnhofs- und Gleisbaus sowie die Umrechnung der Ergebnisse auf konkrete U-Bahn- und Tram-Bauprojekte.

Für den Klimanutzen werden anhand vorliegender Fahrgastprognosen die eingesparten Kilometer von Pkw- und Busfahrten errechnet, um die Minderung der Kohlendioxidemission zu ermitteln.

Mit beiden Kennwerten – Klimaschaden und Klimanutzen – kann der Zeitraum berechnet werden, innerhalb dessen die **Emissionen des jeweiligen Bauvorhabens sich amortisieren**.

Relation von Klima-Schaden und Klima-Nutzen

Der Neubau eines durchschnittlichen Kilometers U-Bahn-Tunnelstrecke setzt rund 100.000 Tonnen CO₂ frei. In Berlin sind derzeit verschiedene Vorschläge für U-Bahn-Verlängerungen im Gespräch. Die Länge der näher untersuchten Tunnelstrecken beträgt zwischen knapp einem und rund fünf Kilometern. Die Umsetzung dieser Projekte würde jeweils zwischen 100.000 und 500.000 Tonnen des klimaschädlichen Kohlendioxids emittieren.

Bei einem prognostizierten Aufkommen zwischen 7.000 und 40.000 neuen Fahrgästen pro Tag auf den projektierten Strecken läge das CO₂-Einsparpotential infolge ersetzter Bus- und Autofahrten zwischen 700 und 5.000 Tonnen CO₂ pro Jahr. Bis die **beim Bau der U-Bahn-Trassen freigesetzten CO₂-Mengen** durch die CO₂-Einsparungen **im Betrieb amortisiert** werden könnten, würden **zwischen 109 und 230 Jahre** vergehen.

Der Neubau von einem Kilometer Straßenbahntrasse setzt hingegen zwischen 7.000 und 12.000 Tonnen CO₂ frei – nur etwa ein Zehntel. Im Fall der aktuell in Planung befindlichen **Straßenbahn-Trasse** vom Alexanderplatz zum Kulturforum wird die durch den Bau bedingte CO₂-Belastung bereits **nach 9,4 Jahren Betrieb amortisiert**.

Die Planung sieht in Teilen, wo die Trasse in einer auch von Autos genutzten Fahrbahn verläuft, ein Betonbett vor. Würde die Trasse stattdessen komplett als eigener Gleiskörper in Schotter-Oberbau oder Rasenbett realisiert, würde sie nach 8,1 Jahren amortisiert.

Somit stellt sich die Frage, ob angesichts der **Klimakrise U-Bahn-Verlängerungen**, deren Bau auf einen Zeitraum von **mehr als 100 Jahren zunächst weiter** zu einer **Verschärfung dieser Krise** beitragen würde, ernsthaft für die Verbesserung der Infrastruktur herangezogen werden dürfen.

In der Verantwortung gegenüber den Pariser Beschlüssen zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 Grad dürften solche Projekte nur dann geplant und umgesetzt werden, wenn sie ein um Größenordnungen höheres Potential für neue Fahrgäste aufweisen könnten.

Zur Erweiterung des Angebots des öffentlichen Verkehrs ist deshalb die **Straßenbahn das geeignetere Verkehrsmittel**. Sie ist preiswerter und ihr Ausbau in deutlich kürzerem Zeitraum zu verwirklichen. Und unter dem Gesichtspunkt der anzustrebenden Klimaneutralität ist sie der U-Bahn um Längen voraus. Genau genommen um mehr als 100 Jahre.



CO₂-Emission des U-Bahn-Baus



Jedes U-Bahn-Los hat eigene spezifische Bedingungen: Tiefenlage unter Gelände, Bodenarten, Schichtdicken, Hydrologie, Baugrubenbreite, eine oder zwei Steifenlagen (korrespondierend mit Tiefenlage), Verträglichkeit der Grundwasserabsenkung für umgebende Bebauung und Bäume, Rammen oder Einpressen der Verbauträger, Rückbaumöglichkeiten oder Integration der Baugrubenwand in das permanente Bauwerk, Deckelbauweise zur Aufrechterhaltung des Oberflächenverkehrs, nicht zuletzt der aktuelle Stahlpreis. Dies alles fließt in die Abwägung der Regel-Verfahren der Baugrubenerstellung ein:

Offene Bauweisen

- Trägerbohlwand (Abb. 2): kostengünstig; vorwiegend verwendete Baugrubenwand im Berliner U-Bahn-Bau
- Spundwand
- Bohrpfahlwand, überschnitten oder tangierend
- Schlitzwand (Abb. 3)

Bergmännische Bauweise¹

- Schildvortriebsverfahren mittels Tunnelbohrmaschine

Es gibt weitere, seltener vorkommende Sonderbauarten wie z. B. Bau unter Vereisung, die hier außer Acht bleiben.

Für die Abschätzung der CO₂-Emission für den Bau eines durchschnittlichen U-Bahn-Kilometers in Berliner Vororten wird im vorliegenden Gedankenmodell als günstigst anzunehmender Fall dasjenige Bauverfahren zum Ansatz gebracht, das die geringsten CO₂-Emissionen erbringt: die offene „Berliner Bauweise“ mittels Trägerbohlwänden.



2

Abb. 2: Tiefbau mittels Trägerbohlwänden (München). Zur Herstellung der Baugrube werden Stahlträger eingerammt oder eingepresst und Zwischenräume mit Holzbohlen gesichert.



3

Abb. 3: Rückverankerte Schlitzwände (Berlin Hbf)

Ein Kubikmeter Beton wiegt 2,4 Tonnen; das entspricht zwei Mittelklasse-Pkw. Die Hauptbestandteile des Stahlbetons, Zement und Stahl, drücken aufgrund ihrer energieaufwändigen Herstellung aufs Klima.

Die **Zementherstellung** ist verantwortlich für ca. 8% der globalen CO₂-Emissionen. Knapp die Hälfte davon entsteht beim Brennen von Zementklinker bei 1.450°C, fast ausschließlich mit fossilen Energieträgern. Hieran ändert auch die seit einigen Jahren angewendete Feuerungsbeimengung von Plastikabfall, die sogenannte „thermische Verwertung“ des Grünen-Punkt-Mülls, nichts. Für über die Hälfte des CO₂-Ausstoßes ist Kalziumoxid verantwortlich, da Kalk bei der unvermeidlichen Umwandlung in Oxid, der sogenannten Calciniierung, Kohlendioxid freisetzt.

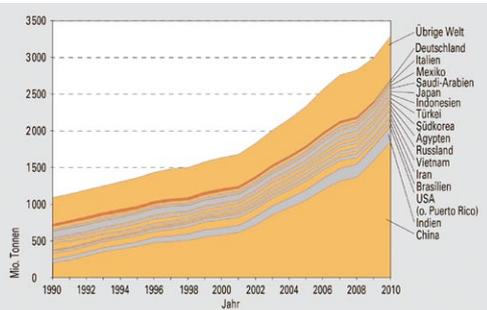


Abb. 4: Entwicklung in den 16 Staaten mit dem höchsten Zementverbrauch (lt. Cembureau)

Abb. 5: Einbringen des Transportbetons für eine Tunneldecke (Berlin, U-Bf. Rotes Rathaus, Linie U5). Augenfällig ist der hohe Anteil an Stahlbewehrung.

4

Durch die deutsche Industrie wurde 2017 ein „Globales Erwärmungspotenzial“² von 193 Mio. t CO₂-Äquivalent ausgestoßen, wovon ein bedeutender Anteil von 20,5 Mio. t CO₂-Äquiv. auf die Zementproduktion zurückzuführen ist. Der Zementverbrauch ist weltweit stark steigend, siehe Abb. 4. Insgesamt fällt für jede Tonne Zement bei der Produktion eine Tonne CO₂ an. Wäre die Zement-Industrie ein Staat, sie läge bei den CO₂-Emissionen an dritter Stelle, hinter China und den USA.

Mit der Online-Baustoffdatenbank ÖKOBAUDAT stellt das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat eine Datenbasis für die Ökobilanzierung von Bauwerken zur Verfügung. Hier wird für die **Herstellung von einem Kubikmeter Beton** (ohne Bewehrungsstahl – dieser wird gesondert berechnet) ein Wert von 300 kg CO₂-Äquivalenten angegeben. Hinzu kommen für den Transport 28,8 kg und für den Einbau 1,08 kg CO₂-Äquivalente; dies ergibt eine Zwischensumme von 329,88 kg CO₂-Äquivalenten.



5

Der zweite wesentliche Bestandteil des Betons ist neben dem Zement der **Baustahl für die Bewehrung**. Die CO₂-Emission bei der Erzeugung einer Tonne Rohstahl ist aufgrund der benötigten Hochofen-Temperaturen von bis zu 2.000 °C immens. Sie beträgt rund 1,5 t CO₂-Äquivalente.³

Die Stahlbewehrung ist wegen der unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten jeweils im Einzelfall zu bemessen. Im U-Bahn-Bau sind in die Tunnelsohle und in die Tunneldecke besonders große Anteile an Bewehrung einzubringen, da diese aufgrund der Zugfahrten sowie durch den Oberflächenverkehr (vor allem Lkw) besonders hohe dynamischen Lasten aufnehmen müssen; vgl. Abbildung 5. Wir rechnen in dieser Studie für Betonsohle, -wände und -decke mit einem Durchschnittswert von 8 Volumen-Prozent Bewehrungsanteil im Stahlbeton.

Der CO₂-Ausstoß der **Zuschlagstoffe Sand und Kies** ist abhängig vom Gewinnungsort, Lagertiefe und Transport-

Herstellung und Einbau eines **Kubikmeters Stahlbeton** emittieren **1,84 Tonnen CO₂**.

weg; der hier angenommene Durchschnittswert – wie auch beim Aushub und Verfüllung der Baugrube – liegt bei rund 0,1 t CO₂ pro 1 m³ Material. Die Bestandteile des Betons müssen gewonnen, gemischt und zum Einbauort geliefert werden. Hinzu kommen: Verschalungen herstellen, liefern, aufstellen; Bewehrung einbringen (oft als „Körbe“); Beton-Schüttung, Beton-Verdichtung, Ausschalen (einschließlich Entsorgung der Verschalungen), Fugenabdichtung, nachträgliches Abdichten von Rissen durch Injektionen. Für sämtliche Verarbeitungsschritte zusammen wird näherungsweise ein Zuschlag von 10% angesetzt. Die vergleichsweise geringen CO₂-Wirkungen des Anmachwassers und spezieller Betonzusatzmittel wie Fließmittel, Verzögerer und Dichtungsmittel werden hier vernachlässigt.

Unter vorstehend geschilderten Rahmenbedingungen ergibt sich für den im U-Bahn-Tunnelbau verwendeten **wasserundurchlässigen Stahlbeton** eine Emission von 1,670 t CO₂ + 10% = 1,837 t CO₂ pro 1 m³ Stahlbeton.

Tabelle 1: CO₂-Fußabdruck des im U-Bahn-Bau verwendeten wasserundurchlässigen Stahlbetons

CO ₂ -Emission von 1 m ³ Stahlbeton	Volumen-Anteil [%]	Rohdichte [t/m ³]	Gewicht [t]	spez. CO ₂ -Emission	CO ₂ -Emission bei 92%/8% [t CO ₂ /m ³]	CO ₂ -Emission [pro t/m ³]
Beton (Zement, Kies, Wasser)	92	2,40	2,21	0,33 t CO ₂ /t	0,73	0,728
Stahl	8	7,85	0,63	1,50 t CO ₂ /t	0,94	0,942
SUMME	100	-	2,84	-	-	1,670
+ 10 % (u.a. Schalung herstellen, Bewehrung "flechten")						0,167
					[t CO ₂ /m ³]	1,837

1

Für die Abschätzung der CO₂-Emission für den Bau eines durchschnittlichen U-Bahn-Kilometers in Berliner Vororten wird im vorliegenden Gedankenmodell als günstigster anzunehmender Fall das Bauverfahren zum Ansatz gebracht, das die geringsten CO₂-Emissionen erbringt: die kostengünstige, offene „Berliner Bauweise“⁴

Weitere **Komponenten und Randbedingungen**, die der Ermittlung der CO₂-Emission beim Bau eines durchschnittlichen U-Bahn-Tunnel-Kilometers zugrunde liegen, sind im Anhang dargestellt. Es sind dies unter anderem Einzelheiten zu Abmessungen und Ausstattung der U-Bahn-Strecke und der U-Bahnhöfe, klimarelevante Angaben zu Stahlschiene, Gleisschotterbett, Holzschwellen, Stromschiene sowie zur Ausführung der Trägerbohlwände für den „Berliner Verbau“ der Baugruben. Berücksichtigt werden ferner zur Auftriebssicherung notwendige Bodenanker und zuletzt der Aufbruch und Neubau der Straßendecke sowie Aushub und Materialbewegungen.

1) Der Begriff „Bergmännische Bauweise“ für den Bau eines U-Bahn-Abschnitts könnte nahelegen, dass hierbei die Straßen- und Geländeoberflächen unbeeinträchtigt bleiben. Dem ist nicht so: Die U-Bahnhöfe werden i. d. R. offen gebaut, ebenso wie Bereiche für Gleiswechselanlagen und Abstellanlagen, Startgrube und Zielgrube für die Tunnelbohrmaschine. Hinzu kommen große Baustelleneinrichtungsflächen einschließlich Separierungsanlage für Bodenmaterial und Spülmittel, Grundwassermanagement und Anlagen zum Abtransport des Abraums.

2) Um die Wirkung verschiedener Treibhausgase vergleichbar zu machen, hat das Expertengremium der Vereinten Nationen (IPCC) das so genannte Globale Erwärmungspotenzial definiert. Es wird auch CO₂-Äquivalent

genannt und gibt an, wie viel eine bestimmte Masse einer chemischen Verbindung im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt.

3) Derartige CO₂-Ausstoß wird die Stahlherzeugung unvermeidlich noch für viele Jahre begleiten. Eine Umstellung auf weniger klimaschädliche Verfahren, z. B. die noch zu entwickelnde „Wasserstoff-Route“, wird nach aktuellen Abschätzungen 200 Milliarden Euro kosten und den Stahl um 60% verteuern.

4) unter der Annahme, dass Wasserhaltung bis unter die tiefste Stelle der Baustellensohle zugelassen wird. Ferner wird tragfähiger Boden angenommen, und dass keine besonderen Schwierigkeiten (z. B. Unterfahrungen von Häusern, Gewässern oder Brückenstützen der Deutschen Bahn) auftreten.

Der Bau von einem durchschnittlichen **Kilometer U-Bahn-Tunnel** (Tunnelstrecke und -bahnhöfe) bewirkt eine Emission von **99.000 Tonnen CO₂**.

Die Darstellung der Komponenten und Randbedingungen, die der tabellarischen Ermittlung der CO₂-Emission zugrunde liegen, finden sich im Anhang.

U-BAHN-BAU - Maßnahme pro Kilometer	Menge	[t CO ₂]	Zwischenrechnung 1	Zwischenrechnung 2
Aushub U-Bahnhof, 12 m tief, 17 m breit, 110 m lang	22.440 m ³	205,4	12*17*110=22.440	22.440*0,0092=417,3
Beton U-Bahnhof, Außenwände, Decke, Boden, 2m*5,85m+17m*2,5m= 54,2 m ² , 110 m lang	5.962 m ²	10.954,7	(17*2,5+2*5,85)*110 =5.962	5.962*1,84=10.954,7
Zuganker zur Auftriebssicherung, 140 Stützen, L = 12 m, Gewicht: 252,89 kg, 140 Stück => 35,405 t pro U-Bahnhof	140 Stück	61,1	0,25289*140=35,405 t => 53,1 t CO ₂ /U-Bf	+ 15 % Transport, Einbau => 61,1
Stahl-Mittelstützen U-Bahnhof, 25 Stück, mit Beton ummantelt, Gewicht: 8,835 t	25 Stück	15,9	8,835 * 1,5=13,25	13,25 + 20 % (Beton) =15,9
Verfüllung U-Bahnhof, 3,65 m tief, 17 m breit, 110 m lang	6.825,5 m ³	62,5	3,65*17*110=6.825,5	6.825,5*0,0092=62,5
Bahnsteigplatte (9 m * 110 m * 0,4 m = 396 m ³)	396 m ³	727,6	396*1,84=727,6	
Treppen, Quergänge (Zwischengeschosse), Fahrtreppen (Rohbau), Aufzüge (Rohbau)	pauschal	1.000,0		
Fahrtreppen, Aufzüge (Maschinen)	pauschal	500,0		
Innenausbau, (z.B. Estrich, Wand- und Bodenfliesen, Beleuchtung, Infosysteme)	pauschal	500,0		
Betriebsräume (z.B. E-Verteiler, Telekommunikation, Notstromanl., Müllraum, Brandschutz/Entrauchung)	pauschal	1.000,0		
Aushub Trompete, 12 m tief, im Mittel 13 m breit, 2 * 150 m lang	46.800 m ³	428,3	12*13*300=46.800	46.800*0,0092=428,3
Beton Trompete, Breite im Mittel 13m, lichte Höhe 4,50m, 2m * 4,50m + 2,5m * 13m = 41,5m ² , 2 * 150m lang	12.450 m ²	22.875,8	41,5m ² * 300m => 12.450m ³	12.450*22.875,8
Verfüllung Trompete, 5 m tief, 13 m breit, 2 * 150 m lang	19.500 m ³	178,5	5*13*300=19.500	19.500*0,0092=178,5
Zwischensumme	-	38.509,6		
1,25 * U-Bahnhof mit Trompeten	-	48.137,0		
Baustelleneinrichtung, Arbeitsgeräte mit An-, Abfahrt, Energie, Wasserhaltung, Provisorische Straßenführung	pauschal	4.000,0		
Berliner Verbau, 8.394,1 kg CO ₂ /fld. m	8.394,1 kg/m	8.394,1	8394,1 kg * 1.000 m =8.394,1 t CO ₂ /km	
Beseitigung von Findlingen und anderen Hindernissen im Boden	pauschal	250,0		
Aushub U-Bahn-Tunnel, 12 m tief, 9 m breit, 487,5 m lang	58.500 m ³	535,4	58.500*0,0092=535,4	
Beton U-Bahn-Tunnel, Breite 9 m, lichte Höhe 4,50 m, 2 m * 4,50 m + 9 m * 2,5 m = 31,5 m ² ; 487,5 m lang	15.356,3 m ²	28.215,9	31,5*487,5=15.356,3	15.356,3*1,84 = 28.215,9
Verfüllung U-Bahn-Tunnel, 5 m tief, 9 m breit, 487,5 m lang	21.937,5 m ³	200,8	5*9*487,5=21.937,5	21.937,5*0,0092=200,8
Für neue Leitungen: Aushub + Verfüllung => 2 * 2 m * 2 m * 1.000 m	8.000 m ³	73,2	8.000*0,0092=73,2	
Abbruch von Leitungen und Neubau an anderer Stelle	pauschal	4.000,0		
Notausstiege, 188 m ³ Stahlbeton + 20 % (Metalltreppe, Abschlussgitter, Einbau), 2,5 Stück pro km	188 m ³	1.036,3	2*(5*2*1)+2*(5*12*1)+2*(2*12*1) = 188 m ³	> 1,5 t CO ₂ pro Meter 188*1,84*1,2*2,5 = 1.036,3
Unterwerk = ¼ pro km; einschl. Fernschaltanlagen	pauschal	1.200,0		
Stellwerk (1/8 pro km), Signale, Gleismagnete	pauschal	800,0		
Gleise (Schotteroberbau) und Weichen (4 Stück pro km)	2.100 m	730,8	2,1*348=730,8	
Stromschiene (Alu)	2.100 m	428,4	2,1*204=428,4	
Kupferkabel (Bahnstrom + 50 Hz) und Glasfaserkabel, Incl. Wandbefestigungen im Tunnel und Ziehschächten im Bahnsteigbereich, Tunnelbeleuchtung, Bahnfunk.	pauschal	800,0		
SUMME		98.801,8		
SUMME, gerundet		~ 99 Tsd. t CO₂		

Tabelle 2: Ermittlung der CO₂-Belastung durch den Bau eines Kilometers U-Bahn-Tunnel

Bei U-Bahn-Neubau-Abschnitten in Berliner Vororten kommen erfahrungsgemäß 10% der U-Bahn-Fahrgäste als Umsteiger vom Pkw. Im Berliner Innenstadtbereich ist mit 15% Umsteigern vom Pkw zu rechnen. Wir setzen aufgrund der Aussicht auf eine erfolgreiche Verkehrswende die optimistische Schätzung von 20% Pkw-Umsteigern an. Die übrigen Fahrgäste des neuen U-Bahn-Abschnitts sind Umsteiger von anderen öffentlichen Verkehrsmitteln oder waren zuvor zu Fuß oder mit dem Fahrrad unterwegs. Ein geringer Anteil ist neu induzierter Verkehr.

Tabelle 3 zeigt die überschlägige Berechnung der Jahre, die zur **Kompensation der CO₂-Emission** beim U-Bahn-Bau durch **vermeidene Pkw- und Bus-Fahrten** benötigt werden. Die in Berlin aktuell untersuchten U-Bahn-Verlängerungen sind in der linken Spalte aufgeführt, ganz rechts steht jeweils die Anzahl der Jahre, die benötigt werden, um den bei ihrem Bau verursachten CO₂-Ausstoß durch vermeidene Pkw- und Omnibus-Fahrten zu kompensieren. Deutlich wird: Keine der vorgeschlagenen U-Bahn-Verlängerungen ist in weniger als 100 Jahren zu kompensieren.

3

Strecke	Kosten	L [km]	CO ₂ beim U-Bahn-Bau [t]	Zuschläge [t CO ₂]	V-Aufkommen [Fg. pro Tag]	Davon Umsteiger vom Pkw (20 %)	Vermiedene Bus-km [=L*2,5] ^{x1}	Jährl. vermiedenes CO ₂ der Pkw [t] ^{x2}	Jährl. vermiedenes CO ₂ der Busse [t] ^{x3}	Jahre zur Kompensation ^{x4}
U9 Nord	300 Mio €	3,27	378.582	25.000 ^{x7} +17.500 ^{x8} +13.000 ^{x9}	40.000	8.000	8,18	2.675,2	794,7	109
U7 BER ^{x5} , Tunnelabschnitte	700 Mio €	5,10	534.389	+13.000 ^{x9} +17.500 ^{x10}	38.000	7.600	22,00	3.176,8	2.138,6	114 ^{x6}
U7 BER ^{x5} , offener Abschnitt		3,70	71.001	+ 35.000 ^{x11}						
U3 Süd	40 Mio €	0,90	88.922	-	7.000	1.400	2,25	468,2	218,7	129
U8 Nord	210 Mio €	2,10	220.484	+13.000 ^{x9}	12.000	2.400	5,25	802,6	510,4	168
U6 TXL	150 Mio €	1,95	231.914	+26.250 ^{x12} +13.000 ^{x9}	8.000	1.600	4,88	535,0	473,9	230
U2 Pankow Kirche	85 Mio €	0,55	67.341	+13.000 ^{x9}	<i>n. bek.</i>	<i>n. bek.</i>	1,38	<i>n. bek.</i>	133,7	<i>n. bek.</i>
U7 Heerstraße	<i>n. bek.</i>	3,86	394.375	+13.000 ^{x9}	<i>n. bek.</i>	<i>n. bek.</i>	9,65	<i>n. bek.</i>	938,1	<i>n. bek.</i>

x1) Annahme: Für 1 km U-Bahn-Neubauabschnitt werden 2,5 km Bus-Linienabschnitte eingestellt. Die Omnibusse verkehren von 4-6 Uhr im 20-Min-Takt, von 6-21 Uhr im

10-Min-Takt, und von 21-1 Uhr im 20-Min-Takt. Von anderen U- und S-Bahn-Linien wandern ebenfalls Fahrgäste ab, hier erfolgen jedoch keine Takt-Reduzierungen.

x2) Ermittlung des vermiedenen CO₂-Ausstoßes von Pkw s. Anhang, Besetzungsgrad: 1,25.
x3) Ermittlung des vermiedenen CO₂-Ausstoßes von Linienbussen siehe Anhang.

x4) Anzahl Jahre = CO₂ (U-Bahn-Bau) / CO₂ (jährl. Ersparnisse Pkw + Busse).
x5) L = 8,8 km, davon 5,1 km im Tunnel und 3,7 km in offener Bauweise. Für die offene

In Berlin **diskutierte U-Bahn-Verlängerungen:**

Aus Sicht der BVG sind vordringlich ...

- die Verlängerung der U6 auf das ehemalige Tegeler Flugfeld mit geschätzten 8.000 Fahrgästen und Baukosten in Höhe von 150 Mio €
- die U7 zum neuen Flughafen BER mit der Prognose von 38.000 Fahrgästen und 700 Mio € Baukosten
- die U9 zum S-Bahnhof Pankow für 300 Mio € mit 40.000 Fahrgästen.

Der Abgeordnete Tino Schopf nennt ...

- die U3 nach Mexikoplatz mit 7.000 Fahrgästen und 40 Mio € Baukosten
- die U8 ins Märkische Viertel mit 15.000 Fahrgästen und 210 Mio € Kosten
- die U2 nach Pankow Kirche; Verkehrsprognose und Kosten unbekannt.

Die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz prüft ...

- eine Verlängerung der U7 von Rathaus Spandau bis Heerstraße Nord; Verkehrsprognose und Kosten unbekannt.

Bauweise wird der Straßenbahnwert 7.144 kg CO₂/km angesetzt, zzgl. 25% für größeren Gleisabstand und aufwändige Drainage, zzgl. 800 kg CO₂/km für Zugsicherungstechnik: $3,7 \cdot (7.144 \cdot 1,25 + 800) + 35.000 = 71.001$ kg CO₂.
 x6) Bei der U7-Verlängerung wurde aufgrund der besonderen Situation – Großflughafen am Endpunkt der Linie – eine um 25% längere

durchschnittliche Reiseweite angesetzt.
 x7) Unter fünf großen Wohnblöcken Hausunterführungen herstellen, gemäß Grobermittlung à 5.000 kg CO₂ => + 25.000 kg CO₂.
 x8) Umsteigebahnhof Pankow U9 unter U2 herstellen -> + 50% => + 17.500 kg CO₂. Zudem komplizierter Tunnelbau unter kreuzender Straßenbahntrasse.

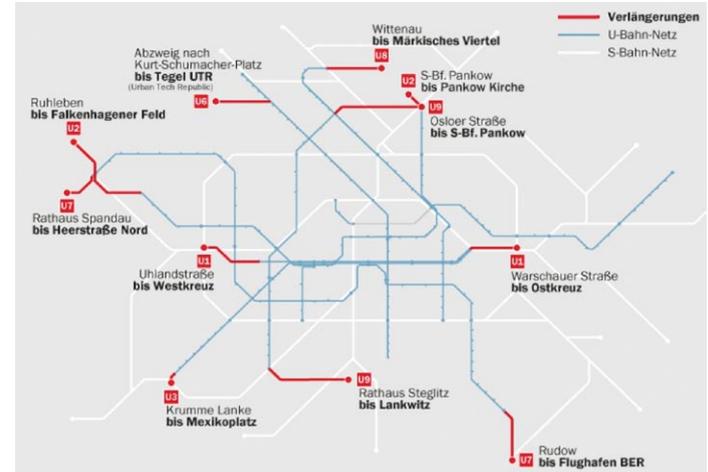


Abb. 19: Mögliche Erweiterungen des Berliner U-Bahn-Netzes. Quelle: BVG, Stand 3/2020

x9) Endbahnhof, Kehr- und Abstellanlage: Streckentunnel auf 250 m Länge 10 m breiter; zusätzlich 11 Weichen, 400 m Gleis, zusätzliche Stützen, 5 Prellböcke => + 13.000 kg CO₂.
 x10) Umsteigebahnhof unter S-Bf Bahnhof Flughafen BER Terminal 5 herstellen -> + 50% => + 17.500 kg CO₂. Zudem komplizierter Tunnelbau unter ehemaligen Regional-

Bahnsteigen und Fernbahn-/Gütergleisen.
 x11) Zusätzliche Brücken und Straßenverlegungen für offene U-Bahn-Trasse einschl. Aushub für Einschnitt- und Rampenbereiche und Grunderwerb/-freimachung.
 x12) Komplizierter Umbau U-Bf Kurt-Schumacher-Platz und zusätzliches Ausfädelungsbauwerk -> + 75% => + 26.250 kg CO₂.

Die CO₂-Emission des U-Bahn-Baus stellt einen Malus dar; die Emissionseinsparung durch Verlagerungen vom Auto- zum U-Bahn-Verkehr ist als Bonus zu werten. Beide Werte werden zueinander ins Verhältnis gesetzt, um die Klimawirksamkeit einer neuen U-Bahn-Trasse beurteilen zu können.

Der Emission von 99.000 t CO₂ je Kilometer der hier betrachteten **U-Bahn-Bauprojekte** steht eine jährliche Einsparung von durchschnittlich 714 t CO₂/km gegenüber. Daraus ist abzuleiten, dass der Neubau der für Berlin vorgeschlagenen U-Bahn-Tunnelstrecken sich aus Emissionssicht **nach durchschnittlich 139 Jahren amortisiert**. Bei Einbeziehung der partiell oberirdischen Strecke (U7 zum BER) sinkt der Durchschnitt auf 128 Jahre.

Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen



CO₂-Emission des Straßenbahn-Baus

Emission je km Bau von **Straßenbahn-Trassen:** zwischen **7.145 Tonnen** (Schotter- oder Rasenbett) und **12.210 Tonnen CO₂ je km** (in Betonbett)

Der Kennwert für die CO₂-Emission je km Trassenneubau bei Straßenbahnen ist um Faktor 8,1 bis 13,8 mal kleiner als derjenige für U-Bahn-Trassenneubau.

Anmerkung: Die Kosten für einen Kilometer Straßenbahn-Trassenneubau belaufen sich in Berlin auf ebenfalls rund den zehnten Teil der Kosten für einen Kilometer U-Bahn-Bau.

Tabelle 4: Ermittlung der CO₂-Belastung durch einen Kilometer Straßenbahn-Streckenuebau

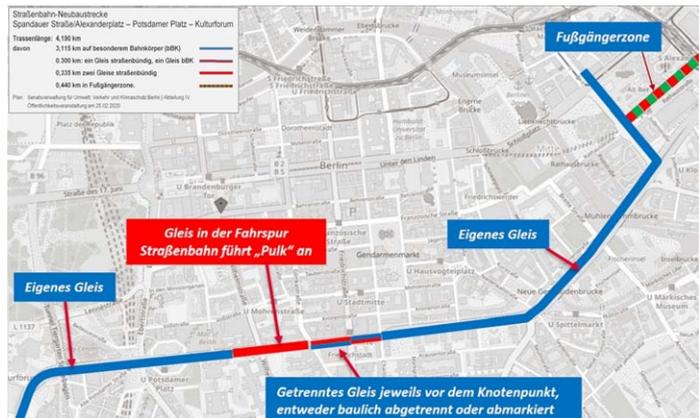
	STRAßENBAHNBAU - Maßnahme pro Kilometer	Menge	[t CO ₂]	Zwischenrechnung 1	Zwischenrechnung 2
1	Aushub Haltestelle, 62 m lang, 2*2,50 m breit, 0,4 m tief	124 m³	1,1	62*5*0,4=124	124*0,0092=1,1348
2	Aushub f. Bahnsteigtafeln, L: 62 m, B: 2 * 0,50 m, T: 0,7 m	43,4 m³	0,4	62*1*0,7=43,4	43,4*0,0092=0,397
3	Aushub f. Haltestellengleise, L: 62 m, B: 6,36 m, T: 0,8 m	315,5 m³	2,9	62*6,36*0,8=315,456	315,5*0,0092=2,9
4	Tragschicht Bahnsteige, L: 62 m, B: 2 * 2,50 m, T: 0,3 m	93,6 m³	0,9	62*5*0,3=93,6	93,6*0,0092=0,9
5	Bahnsteigtafeln, L: 62 m, B: 2 * 0,50 m, T: 0,6 m	37,2 m³	0,84	62*1*0,6=37,2	37,2*1,84=68,4
6	Plattenbelag Bahnsteige, L: 62 m, B: 2 * 3 m, T: 0,1 m	37,2 m³	68,4	62*6*0,1=37,2	37,2*1,84=68,4
7	Aushub alte Leitungen, L: 62 m, B: 4 m, T: 1,20 m	297,6 m³	2,7	62*4*1,20=297,6	297,6*0,0092=2,7
8	Neubau alte Leitungen, L: 62 m, B: 4 m, T: 2 m	496,0 m³	4,5	62*4*2=496	496*0,0092=4,5
9	Abbruch von Leitungen u. Neubau, incl. Bahnstromkabel	pauschal	400,0	groß ermittelter Durchschnittswert	
10	Verfüllung alte Leitungen, L: 62 m, B: 4 m, T: 1,20 m	297,6 m³	2,7	62*4*1,20=297,6	297,6*0,0092=2,7
11	Verfüllen neue Leitungen, L: 62 m, B: 4 m, T: 2 m	496 m³	4,5	62*4*2=297,6	496*0,0092=4,5
12	Trag-/Frostschuttschicht unter Haltestellengleisen	118,3 m³	1,1	62*6*0,3=118,3	118,3*0,0092=1,1
13	Beton u. Auspflasterung für Haltestellengleise L: 62 m, B: 5,36 m, T: 0,5 m	166,2 m³	305,3	62*5,36*0,5=166,15	166,15*1,84=305,3
14	Alternativ: Schotter für Haltestellengleise (einschl. Tragschicht), L: 62 m, B: 5,36 m, T: 0,5 m	166,16 m³	1,5	62*5,36*0,5=166,16	166,16*0,0092=1,5
15	Aushub für vier Rampen, 4 m lang, 2,8 m breit, 0,5 m dick	22,4 m³	0,2	4*4*2,8*0,5=22,4	22,4*0,0092=0,205
16	Tragschicht Rampen, 4 m lang, 2,8 m breit, 0,3 m dick	13,5 m³	0,1	4*4*2,8*0,3=13,44	13,44*0,0092=0,1
17	Vier Rampen, 4 m lang, 2,8 m breit, 0,2 m dick	9,0 m³	16,5	4*4*2,8*0,2=8,96	8,96*1,84=16,5
18	2 (Außenbahnsteige) * Haltestellenausstattung (z.B. Wartehallen, Beleuchtung, Infosysteme)	pauschal	100,0		
18a	Haltestelle mit Betonbett für Gleis, Zwischensumme 1	-	979,7	= SUMME (CO ₂ -Werte in Zeile 1 bis Zeile 17) minus CO ₂ -Wert in Zeile 13 b	
18b	Haltestelle mit Schotterbett für Gleis, Zwischensumme 2	-	674,8	= SUMME (CO ₂ -Werte in Zeile 1 bis Zeile 17) minus CO ₂ -Werte in Zeile 12 und Zeile 13a	
19a	2 * Haltestellen pro km mit Betongleis, Zw.summe 1	-	1.959,3	=2*(CO ₂ -Wert in Zeile 18a)	
19b	2 * Haltestellen pro km mit Schotterbett, Zw.summe 2	-	1.349,6	=2*(CO ₂ -Wert in Zeile 18b)	
20	Baustelleneinrichtung, Arbeitsgeräte, An-, Abfahrt d. Geräte, Energie, z.T. geänderte Straßenführung	pauschal	800,0		
21	Aushub Tramgleise 5,8 m breit, 0,8 m tief. Länge: 1 km minus zwei Haltestellen à 62 m = 876 m	4.064,7 m³	37,2	5,8*0,8*876=4.064,64	4.064,64*0,0092=37,2
22	Beseitigung von Findlingen im Boden	pauschal	50,0		
23	Leitungsbau, Aushub: 1,2 m * 4 m * 876 m	4.204,8 m³	38,5	1,2*4*876=4.204,8	4.204,8*0,0092=38,5
24	Abbruch von Leitungen u. Neubau, incl. Bahnstromkabel	pauschal	2.600,0	groß ermittelter Durchschnittswert	
25	Leitungsbau Verfüllung 1,2 m * 4 m * 876 m	4.204,8 m³	38,5	1,2*4*876=4.204,8	4.204,8*0,0092=38,5
26	Trag-/Frostschuttschicht unter Gleisen, L: 876 m, B: 5,80 m, T: 0,3 m	1.524,3 m³	13,9	876*5,8*0,3=1.524,24	1.524,24*0,0092=13,9
27a	Beton, Auspflasterung u. Entwässerung für Streckengleise (20 Regenwasser-Einlässe) >= L: 876 m, B: 5,8 m, T: 0,5 m	2.540,4 m³	4.671,8	876*5,8*0,5=2.540,4	(2540,4*1,84)/(20*0,2) =4.671,8
27b	Alternativ: Schotter für Streckengleise, *) L: 876 m, B: 5,80 m, T: 0,5 m (einschl. Tragschicht)	2.540,4 m³	23,2	876*5,8*0,5=2.540,4	2.540,4*0,0092=23,2
28	Unterverk = 3,6 pro km	pauschal	600,0		
29	Anpassung/Neubau LSA	pauschal	100,0		
30	Gleise und Weichen (4 Stück/km) für feste Fahrbahn. Betonschwellen sind in Zeile 27a enthalten	2020 m	333,3	1 km Gleis => 150 t CO ₂ + 10 % Einbau	333,3
31	Gleise, Weichen (4 Stück/km) und Holzschwellen für Schotteroberbau	2020 m	539,9	150 t + 93 t + 10 % Einbau	539,946
32	2 * 30 Oberleitungsmaste, Aushub für Fundamente: 0,8 m * 0,8 m * 1,6 m	61,5 m³	0,6	60*0,8*0,8*1,6=61,44	61,44*0,0092=0,56
33	60 Fundamente für Oberleitungsmaste, je 0,8 m*0,8 m*1,6 m	61,5 m³	112,9	60*0,8*0,8*1,6=61,44	61,44*1,84=112,9
34	60 Oberleitungsmaste, je 6 m hoch, 0,4 m dick. Einschl. 4 Abspannvorrichtungen.	45,3 m³	83,1	3,1415*0,04*6*60=45,3	45,3*1,84=83,1
35	Oberleitung einschl. Ausleger	2100 m	400,0		
36	Kupferkabel (Bahnstrom und 50 Hz)	pauschal	250,0		
37	4 Fußgänger-Überwege auf "freier Strecke"	pauschal	120,0		
38a	CO₂-Emission bei 1 km Tram-Neubau (feste Fahrbahn), SUMME 1		12.209,1	= CO ₂ -Wert in Zeile 19a plus SUMME (Zeile 20 bis Zeile 37) minus Zeilen 27b und 31	
38b	CO₂-Emission bei 1 km Tram-Neubau (Schotteroberbau), SUMME 2		7.143,6	= CO ₂ -Wert in Zeile 19b plus SUMME (Zeile 20 bis Zeile 37) minus Zeilen 26, 27a und 30	
39a	CO ₂ -Emission bei 1 km Neubau, Verhältnis Tram (feste FB) zu U-Bahn = 1 : 8,092			= 1 : 8,1	
39b	CO ₂ -Emission bei 1 km Neubau, Verhältnis Tram (Schotter *) zu U-Bahn = 1 : 13,831			= 1 : 13,8	
40	*) Mit Rasengleis können hinzu => 8 : 5,70 km, L: 1.000 m, T: 0,15 m	855 m³	8,61 t CO ₂	5,7*1.000*0,15=855	855*0,0092*1,8=14,61
41	Das Verhältnis Tram zu U-Bahn wäre dann 1 : 13,814			weiterhin * 1 : 13,8	

Geplante Straßenbahntrasse Alexanderplatz – Kulturforum:

Kulturforum: Zum Vergleich mit der U-Bahn soll für eine Straßenbahn-Beispielstrecke mit den ermittelten CO₂-Durchschnittswerten für Rasengleisbau bzw. Bau in fester Fahrbahn der Zeitraum in Jahren ermittelt werden, nach dem die CO₂-Emission für den Bau ausgeglichen sein wird durch vermiedene Pkw- und Omnibusfahrten.

Aktuell in Planung befindet sich im Land Berlin die Straßenbahnverlängerung Spandauer Straße / Alexanderplatz – Potsdamer Platz – Kulturforum. Für diese Verlängerung sieht die Senatsplanung sowohl Schotter-Oberbau als auch feste Fahrbahn in einem engen Bereich der Leipziger Straße sowie in der Fußgängerzone Rathausstraße vor.

Abb. 14 zeigt eine Prinzipskizze des Planungsstands, so wie er im Februar 2020 der Öffentlichkeit vorgestellt wurde.



14

Zur Ermittlung der **Relation von Klima-Schaden und Klima-Nutzen** der Straßenbahnverlängerung Spandauer Straße / Alexanderplatz – Potsdamer Platz – Kulturforum gelten folgende Grundlagen und Annahmen:

- Durchschnittliche Fahrtweite eines Fahrgastes in der Straßenbahn bzw. eines Pkw-Insassen: ca. 8 km
- 1 km Straßenbahn-Bau emittiert zwischen ca. 7.144 t CO₂ (Schotteroberbau bzw. Rasengleis) und 12.210 t CO₂ (feste Fahrbahn); vgl. Tab. 4
- 1 Pkw erzeugt 157 Gramm CO₂ je km (siehe Anhang).
- Pkw-Besetzungsgrad: 1,25 Personen je Pkw
- Pro Kilometer neu gebauter Straßenbahnlinie werden durchschnittlich 2,5 km an Buslinien eingespart. Zur Ermittlung der dadurch jährlich vermiedenen CO₂-Emissionen von Busfahrten siehe Anhang.

Abb. 14: Straßenbahnverlängerung Spandauer Straße / Alexanderplatz – Potsdamer Platz – Kulturforum mit Eintragungen der Oberbauarten, Prinzipskizze. Plangrundlage: SenUVK, mit eigenen Längenermittlungen

Tab. 5: Ermittlung der Jahre, die bis zur Kompensation der CO₂-Emission für den Bau der Straßenbahnverlängerung Alexanderplatz – Kulturforum durch vermiedene Pkw- und Bus-Fahrten nötig sind.

Strecke	Kosten	Baulänge l. (km)	CO ₂ dieses Straßenbahn-Baus (t)	V.Aufkommen (Fahrt. pro Tag)	Davon Umsteiger vom Pkw (20%)	Vermiedene Bus-km (4*10 ⁶ /j)	Jährl. vermiedenes CO ₂ der Pkw (t/j)	Jährl. vermiedenes CO ₂ der Busse (t/j)	Jahre zur Kompensation (%)
Alexanderplatz – Kulturforum, Abschnitte mit bes. Bahnhöfen	88,8 Mio €	3,265	23.324	40.000	8.000	10,48	2.675	1.018	9,4
Alexanderplatz – Kulturforum, straßenbündiger Abschnitte		0,925	11.293						

5

Die CO₂-Emission des Trassen-Neubaus stellt einen Malus dar; die Emissionseinsparung durch Verlagerung von Autoverkehr zur Straßenbahn ist als Bonus zu werten. Beide Werte werden zueinander ins Verhältnis gesetzt, um die Klimawirksamkeit einer neuen Straßenbahn-Trasse beurteilen zu können.

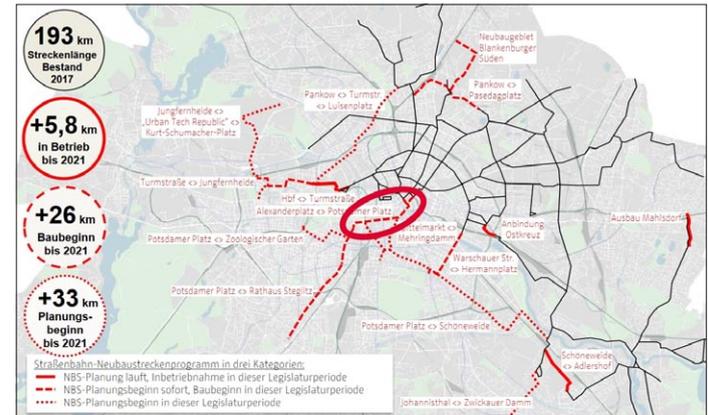
Beim Neubau der hier betrachteten, 4,2 km langen **Straßenbahn-Trasse** werden insgesamt 34.600 t CO₂ freigesetzt. Dem steht eine jährliche Einsparung von durchschnittlich 3.700 t CO₂ gegenüber. Daraus ist abzuleiten, dass dieser Straßenbahn-Trassenbau sich aus Emissionssicht **nach 9,4 Jahren amortisiert**. Würde die Trasse komplett in Schotter- oder Rasenbett verlegt, wäre sie bereits nach 8,1 Jahren amortisiert.

Abb. 15: Straßenbahn-Neubaustreckenprogramm der Berliner Koalition gemäß Koalitionsvertrag 2016. Hervorgehoben: Trassenneubau Alexanderplatz – Kulturforum. Quelle: SenUVK

Der aktuelle Koalitionsvertrag in Berlin sieht den **Ausbau des Straßenbahnnetzes** vor und lässt U-Bahn-Neubau unerwähnt (vgl. Darstellung der Ausbauplanungen, Abb. 15).

Ein Straßenbahn-Neubau erfordert wegen des begrenzten Raums manchmal auch den Wegfall eines Fahrstreifens für Autos, dies ist gerechtfertigt. Die Leistungsfähigkeit eines Fahrstreifens beträgt maximal 700 Kfz pro Stunde. Bei einem durchschnittlichen Besetzungsgrad von 1,25 Personen je Auto entspricht dies 875 Personen pro Stunde. Ein Straßenbahnzug befördert 300 Fahrgäste. Bei 30 Fahrten pro Stunde errechnen sich 9.000 Fahrgäste pro Stunde.

Ferner ist relevant, dass der Bau von Straßenbahntrassen mit kleinteiligen Baulosen auch von mittelständischen Unternehmen durchgeführt werden kann, wohingegen U-Bahn-Bau nur von wenigen Großauf Firmen leistbar ist.



— *Anhang* —

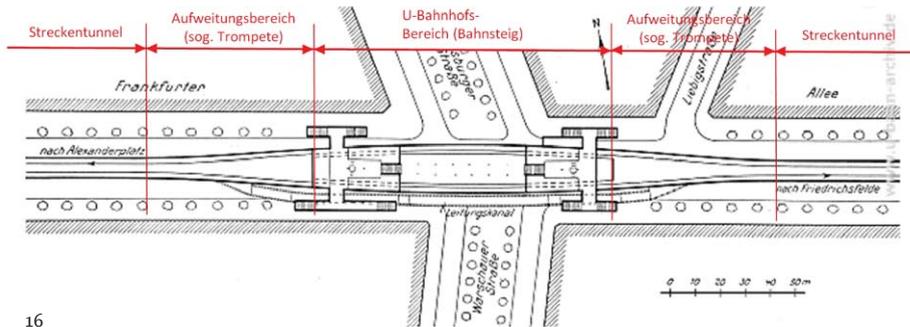


Abb. 16: Lageplan eines U-Bahn-Abschnitts mit verschiedenen Tunnelbereichen: Streckentunnel, „Trompete“, Bahnsteig. Plangrundlage: www.u-bahn-archiv.de

16

Der tabellarischen Ermittlung der CO₂-Emission beim Bau eines durchschnittlichen U-Bahn-Tunnel-Kilometers liegen folgende weitere Komponenten und Randbedingungen zugrunde:

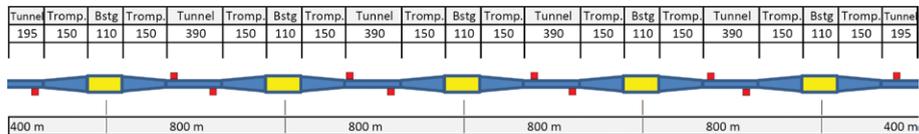
Die **U-Bahn-Strecke** (vgl. Abb. 16 und 17) besteht aus Streckentunnelabschnitten (lichte Breite = 7 m; Außenmaß = 9 m), Bahnsteigebereichen (Außenmaß = 17 m) und den sog. Trompeten (Außenmaß zwischen 9 m und 17 m, durchschnittlich 13 m). Für die in Berlin diskutierten U-Bahn-Streckenverlängerungen wird ein durchschnittlicher Bahnhofsmitabstand von 800 m angenommen, somit werden durchschnittlich 1,25 Bahnhöfe pro Kilometer angesetzt. In Abständen < 300 m werden Notausstiege benötigt.

Ein laufender Meter **Stahlschiene** wiegt 50 kg und verursacht bei der Herstellung 75 kg CO₂. Demzufolge bewirkt 1 km Gleis ($2 \cdot 75 \text{ kg CO}_2 \cdot 1000$) = 150 t CO₂. Hinzu kommt eine 35 cm dicke Schicht **Schotter** auf 3,50 m Breite, Gleisschotter 32–63, mit einem spezifischen Gewicht von 1,40 t/m³. Bei einem Schotter-Volumen von $35 \text{ cm} \cdot 350 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} = 1,23 \text{ m}^3$ sowie Ansatz von +15% für Kompression ergibt sich ein Gewicht von $1,72 \text{ t} \cdot 1,15 = 1,97 \text{ t}$ je laufenden Meter bzw. 1.970 t je Kilometer. Bei Ansatz eines CO₂-Äquivalents von 0,1 t CO₂ pro Tonne Material ergeben sich 197 t CO₂ pro km Gleis. **Holzschwellen** zu je 50 kg, alle 90 cm, ergeben 93 t CO₂ pro km Gleis. Unterschottermatten bzw. Masse-Feder-Systeme, um die Übertragung von Körperschall in angrenzende Gebäude zu minimieren, werden

hier vernachlässigt. Damit verursacht 1 km Gleis mit Oberbau inclusive eines Zuschlags von 20% für Antransport und Einbau ($150 \text{ t} + 197 \text{ t} + 93 \text{ t}$) * 1,2 = 348 t CO₂.

Ein Meter **Stromschiene**, bestehend aus einem Alu-Stahl-Sandwich, wiegt 10 kg und verursacht bei der Herstellung 170 kg CO₂. Mit Stromschienenträgern (auf jeder 8. Schwelle), Abdeckungen und Einbau (zusammen +20%) ergeben sich 204 t CO₂ pro Kilometer.

Die **Trägerbohlwände** für den „Berliner Verbau“ der Baugruben bestehen aus **Doppel-T-Stahlträgern** und einer **Ausfachung aus Holz** (Abb. 2). Die Abstände der Stahlträger, z. B. vom Typ HEB 300 (Gewicht: 117 kg/m), betragen je nach statischen Erfordernissen zwischen 1,5 und 2,5 Meter, hier Annahme: 2,0 m. Stahlträger, 14 m tief eingerammt, alle 2 m, erforderlich sind 0,5 Stück pro Meter * 2 (für beide Seiten), ergeben 1,638 t Stahl, diese verursachen bei der Herstellung 2,457 t CO₂ je Meter Baugrube. 600 kg Trockenmasse Holz bindet 1 t CO₂. Da Bauholz nach der Verwendung zumeist in der thermischen Verwertung landet, wird dieser CO₂-Betrag dort freigesetzt. Ernte, Verarbeitung (Sägen), Lagern (Trocknung) und Transport schlagen mit weiteren 20% zu Buche. Ergebnis: 1 t verwendetes Bauholz setzt 1,67 t CO₂ frei (Quelle: www.klima-sucht-schutz.de). Zur Holzausfachung der Baugrube werden 12 m Tiefe * 1 m Länge * 2 = 24,0 m² Holz benötigt, $\hat{=} 0,1 \text{ t/m}^2 \Rightarrow 2,4 \text{ t Holz}$, dies entspricht 4,0 t CO₂ pro Meter Baugrubenlänge. Mit einem Zuschlag von 30% für Einbau, Zuganker,



Tunnel pro 4 km:	2*195+4*390=	1.950 m
"Trompeten" pro 4 km:	10*150=	1.500 m
Bahnsteige pro 4 km:	5*110=	550 m
SUMME:		4.000 m

Notausstiege pro 4 km:		10
------------------------	--	----

Tunnel pro 1 km:	1.950:4=	487,5 m
"Trompeten" pro 1 km:	1.500:4=	375,0 m
Bahnsteige pro 1 km:	550:4=	137,5 m
SUMME:		1.000,0 m

Notausstiege pro 1 km:	10:4=	2,5
------------------------	-------	-----

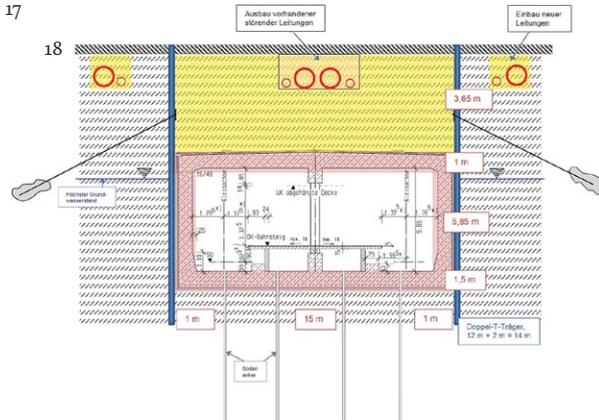
Abb. 17: Abschnittslängen einer idealisierten U-Bahn-Tunnelstrecke (4 km Länge, fünf Bahnhöfe)

Verschnitt etc. ergibt sich je Meter U-Bahn-Tunnel für die Baugrubensicherung „Berliner Verbau“ (2,457 t + 4,0 t) * 1,3 = 8,394 t CO₂ je Meter bzw. 8,394 t CO₂ pro km Strecke.

In Berlin liegen die höchsten Grundwasserstände im Innenstadtbereich zwischen 3 m und 7 m, in den Vororten bei 5 m bis 10 m unter Gelände. Bei den Streckentunnelabschnitten mit ihrem relativ kleinen Luftraum ist im Vorortbereich keine **Auftriebssicherung** notwendig, da das Eigengewicht und die darüber liegende, 5 Meter dicke Auffüllung den Auftrieb verhindern. Bei den Bahnhöfen (Luftraum 15 m breit, Überdeckung nur 3,65 m) sind jedoch **Bodenanker** einzubringen. Bei Unterwasserbetonsohlen wird – je nach geologischen Verhältnissen – ein Ankerraster von ca. 2,0 m bis 5,5 m angewendet. Hier wird gewählt: a = 3,0 m. Bei einem Baugrubeninßenmaß von 15 m * 110 m ergeben sich 35 * 4 = 140 Stützen. Bodenanker HEB: 10 cm * 10 cm, L = 12 m, Gewicht: 252,89 kg. 140 Stück => 35,405 t Stahl, diese erzeugen 53,1 t CO₂ pro U-Bahnhof.

U-Bahnhöfe im Vorortbereich erhalten nicht so repräsentative und verkehr-intensive Bauten wie im Citybereich. Durchschnittliche Bahnhofsabmessungen für das Berliner Großprofilnetz: Bahnsteiglänge 110 m, Bahnsteigbreite 9 m, 25 Mittelstützen. Ausstattung: 4 Treppenaufgänge, 2 Quergänge, 2 Fahrtreppen, 1 Aufzug, Aushub: 12 m, Auffüllung: 3,65 m. Betonwände und -decke: je 1,0 m dick, Fundamentplatte: 1,5 m dick. Lichte Höhe zwischen Fundamentplatte und Decke: 5,85 m.

Abb. 18: U-Bahnhof mit Baugrube, Querschnitt. Idealisierte Prinzipskizze für Massenberechnungen (nicht maßstäblich)



Die U-Bahnhöfe erhalten **Mittelstützen** (Stahl, zum Brandschutz mit Beton ummantelt), da die darüber liegenden Straßen in der Regel für schweren Lkw-Verkehr ausgelegt sind. Ansatz: IPE-Träger (Doppel-T), Abmessungen 500 * 200 mm², Höhe 3,80 m, Abstand 4,4 m, 25 Stück pro Bahnsteig, Gewicht 93 kg/m. Daraus errechnet sich mit dem Gesamtgewicht 3,8 m * 93 kg/m * 25 = 8.835 kg Stahl eine CO₂-Belastung von 15 t CO₂ pro Bahnhof.

Aufbruch des Straßenasphalts und der Tragschicht, Aushub, Abtransport zu Recyclingstation oder Deponie (bei Verunreinigungen, z. B. mit Öl, ist dies Sondermüll) und Materialgewinnung zur Verfüllung, einschließlich Siebung, Zwischenlagerung, Antransport und **Neubau der Straßendecke**, sind gemäß ÖKOBAUDAT mit 9,152 kg CO₂/m³ anzusetzen.

CO₂-Emissionen infolge der Planungsarbeiten, Vermessungen und Baugrunderkundungen werden hier wegen ihrer geringen Anteile in der CO₂-Berechnung vernachlässigt.

Die **CO₂-Emissionen der Pkw-Neuzulassungen** in Deutschland betragen im Jahr 2019 pro Fahrzeug im Durchschnitt 157 g CO₂/km. Dies gilt auch für Batterie-Kfz, da von einem CO₂-Fußabdruck des Stromsystems von 220 g CO₂ pro kWh ausgegangen wird, was zu systemischen Emissionen von ca. 150 g/km Fahrleistung führt. (Quelle: Energie. Wende. Jetzt. Eckpunkte für eine zukünftige Energieversorgung. Prof. Robert Schlögl, Max-Planck-Institut München, April 2019. www.fhi-berlin.mpg.de)

Berechnung der durch Umstieg auf ÖPNV eingesparten Autofahrten:

Die durchschnittliche Fahrdistanz (von Tür zu Tür) unter Teilnutzung des ÖPNV/BVG beträgt in Berlin 8 km. Ein Pkw emittiert auf dieser Strecke 0,157 kg CO₂/km. Eingespart wird eine CO₂-Belastung von 0,157 kg CO₂/km * 8 km = 1,256 kg CO₂. Die Fahrleistung verteilt sich über das Jahr wie folgt: An 52 Samstagen erfolgen 90% der Fahrleistung, an 52 Sonntagen, acht Feiertagen sowie 30 Urlaubstagen pro Jahr werden nur 70% der Fahrleistung erbracht; an den verbleibenden 223 Werktagen des Jahres 100% Fahrleistung. Entsprechend aufsummiert erzeugen die Pkw-Fahrten pro Pkw und Jahr insgesamt 1,256 kg CO₂ * (223 + 0,9 * 52 + 0,7 * (52 + 8 + 30)) = 418 kg CO₂. Diese Emission wird vermieden, wenn 1,25 Personen (durchschnittlicher Besetzungsgrad pro Pkw) aufgrund eines neu gebauten U-Bahn- oder Tram-Abschnitts vom Pkw auf die U-Bahn umsteigen.

Berechnung der durch Umstieg auf ÖPNV eingesparten Busfahrten:

Pro neu gebautes U-Bahn-Kilometer werden in Berlin etwa zweieinhalb Kilometer an Buslinien eingespart (Erfahrungswert aus den letzten 50 Jahren). Die 1.388 Busse der BVG-Flotte verbrauchen je nach Modell zwischen 41,9 und 63 Liter Diesel auf 100 Kilometer (Angabe BVG, Stand 2017). Dies ergibt einen Durchschnittsverbrauch von 52,45 l/100 km und erzeugt 1.389,9 g CO₂ je gefahrenem Bus-Kilometer. Die Ermittlung der gesamten jährlichen Einsparung pro Kilometer Buslinie erfolgt unter folgenden Annahmen: Busverkehr 4-6 Uhr im 20-Min-Takt, 6-21 Uhr im 10-Min-Takt, 21-1 Uhr im 20-Min-Takt. Dies ergibt 2 * 3 Fahrten + 15 * 6 Fahrten + 4 * 3 Fahrten = 108 Fahrten täglich; beide Richtungen ergibt 216 Fahrten. An 52 Samstagen, 52 Sonntagen, acht Feiertagen sowie in den Schulferien (60 Tage) werden davon nur 70% gefahren, an den verbleibenden 193 Schultagen des Jahres 100%. Als jährlich einzusparender CO₂-Ausstoß dieser übers Jahr aufsummierten Busfahrten errechnen sich damit 97.210,72 kg CO₂ pro Kilometer Buslinie.



Autoren:

Matthias Dittmer

Sprecher der Initiative Stadt für Menschen

Dr. Frank Geraets

Diplom-Mathematiker

Axel Schwipps

Dipl.-Ing. Bau- und Verkehrswesen

Herausgeber:

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.

(BUND) – Arbeitskreis Mobilität

Berliner Fahrgastverband IGEB – Interessengemeinschaft

Eisenbahn, Nahverkehr und Fahrgastbelange Berlin e. V.

LAG Mobilität Bündnis 90 / Die Grünen Berlin

Facharbeitsgruppe Öffentlicher Verkehr

Stadt für Menschen – www.stadt fuer menschen.org

Satz und grafische Gestaltung

hypertext.berlin

Bildnachweis

Abb. 1, 5, 6, 10, 11: Foto Archiv Stadt für Menschen

Abb. 2: DB Netz

Abb. 3: www.beton.wiki

Abb. 4: www.zement-verbindet-nachhaltig.de

Abb. 7, 12: Plangrundlage SenUVK/BVG, eigene Eintragungen

Abb. 13: SenUVK/BVG

Abb. 8: Foto Richard Huber / Wikimedia Commons

Abb. 9: Hannoversches Straßenbahn-Museum

Abb. 14, 15: SenUVK

Abb. 16: Plangrundlage www.u-bahn-archiv.de, eigene Eintragungen

Abb. 17: eigene Darstellung

Abb. 18: Plangrundlage BVG, eigene Eintragungen

Abb. 19: Tagesspiegel/Quelle: BVG

Portraitfoto M. Dittmer © Ioanna Koulakou: ioannakoulakou.com

Die Klimabilanz Berliner U-Bahn- und Straßenbahnplanungen

© Matthias Dittmer, Frank Geraets, Axel Schwipps, 2020

Kontakt: matthias.dittmer@gmx.de

Infos online verfügbar unter: **klimabilanz-ubahn-tram.de**